

**УДК 620.179.14**

**В.В. СЕБКО**, д.т.н., доц. кафедры «Химической техники и промышленной экологии», НТУ «ХПИ»

### **ОЦЕНКА ДОСТОВЕРНОСТИ КОНТРОЛЯ, ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ МНОГОПАРАМЕТРОВОГО ВИХРЕТОКОВОГО МЕТОДА КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ ПЛОСКИХ ИЗДЕЛИЙ**

Проведена оценка достоверности контроля параметров плоского изделия при реализации многопараметрового метода.

Наведено оцінювання вірогідності контролю параметрів плоского виробу при реалізації багатопараметрового вихротокового методу

The estimation of plausibility control of a flat item's parameters during realization multiparameter eddy-current method is carried out.

#### **І Введение.**

В современной литературе теория работы трансформаторного вихретокового датчика (ТВД) с плоскими немагнитными и магнитными изделиями рассмотрена в научных статьях [1–9]. В работах [4–8] исследованы амплитудный, фазовый и экстремальные методы контроля электромагнитных и геометрических параметров плоских изделий, дана оценка погрешностей измерений параметров плоских изделий. Однако, методы, рассмотренные в работах [4–8], имели низкую достоверность контроля, так как не учитывали температуру, при которой осуществлялись измерения относительной магнитной проницаемости  $\mu_r$  и удельной электрической проводимости  $\sigma$  [9].

Как известно, методическая составляющая достоверности контроля  $D_m$  увеличивается в случае, если мы определяем большое количество параметров, от которых зависит объект контроля, а инструментальная составляющая увеличивается в случае, если уменьшаются погрешности измерений параметров плоских изделий, например, за счёт аппаратных приёмов в схемах включения тепловых ТВД. Общая достоверность контроля  $D_{общ}$ , равна [10]

$$D_{общ} = D_m \cdot D_{и} \quad (1)$$

Таким образом, повышая методическую и инструментальную составляющие достоверности контроля, мы повышаем общую достоверность контроля  $D_{общ}$  [10]. Достоверность контроля – степень объективного соответствия результата контроля, действительному техническому состоянию контролируемого объекта [10].

Совместный измерительный контроль многих параметров плоских изделий имеет и важное самостоятельное значение, так как позволяет наиболее точно идентифицировать контролируемые изделия, если марка материала не известна.

Следует отметить, что на сегодняшний день не проведена оценка достоверности вихретокового контроля параметров плоских слабоферромагнитных изделий, не исследованы многопараметровые вихретоковые методы совместного измерительного контроля параметров таких изделий, которые позволили бы повысить достоверность контроля плоских образцов. Поэтому, круг решения предстоящих задач, коренным образом расширяется и усложняется, образуя важную научно-практическую проблему, суть которой состоит в создании бесконтактных вихретоковых методов и устройств измерительного контроля геометрических, магнитных, электрических и температурных параметров, позволяющих повысить достоверность контроля параметров плоских изделий.

Таким образом, в настоящей статье будет исследован многопараметровый вихретоковый метод измерительного контроля геометрических, магнитных, электрических и температурных параметров, позволяющий повысить достоверность контроля параметров плоских слабоферромагнитных образцов.

Следует отметить, что совместный измерительный контроль геометрических, электромагнитных и температурных параметров даёт также возможность обеспечить хорошее согласование первичного теплового ТВД с автоматизированными системами управления и контроля важными технологическими процессами, связанными, например, с термической обработкой стальных изделий и конструкций.

Таким образом, **целью работы** является повышение достоверности контроля геометрических, магнитных, электрических и температурных параметров плоских слабоферромагнитных изделий, за счёт реализации разработанного многопараметрового вихретокового метода измерительного контроля на базе теплового ТВД, использующего продольное магнитное поле.

Для достижения цели настоящей работы, необходимо решить следующие задачи:

1. Разработать многопараметровый вихретоковый метод измерительного контроля площади поперечного сечения  $S$ , намагниченности  $j_t$ , магнитной восприимчивости  $k_t$ , относительной магнитной проницаемости  $\mu_{rt}$ , удельной электрической проводимости  $\sigma_t$  и температуры  $t$  плоских слабоферромагнитных изделий.

2. Провести оценку достоверности контроля при реализации известного трёхпараметрового вихретокового метода и предложенного в настоящей статье многопараметрового вихретокового метода измерительного контроля геометрических, магнитных, электрических и температурных параметров.

## **II Многопараметровый вихретоковый контроль параметров плоских слабоферромагнитных изделий с помощью теплового ТВД.**

С учётом схемных реализаций, приведенных в работах [1–9], на рис. 1 дана схема теплового ТВД для совместного измерительного контроля площади поперечного сечения  $S$ , намагниченности  $j_t$ , магнитной восприимчивости  $k_t$ , относительной магнитной проницаемости  $\mu_{rt}$ , удельной электрической проводимости  $\sigma_t$  и температуры  $t$ . Схема теплового ТВД, на рис. 1,

предусматривает нагрев слабоферромагнитных пластин в процессе контроля, для повышения достоверности контроля параметров плоских изделий.

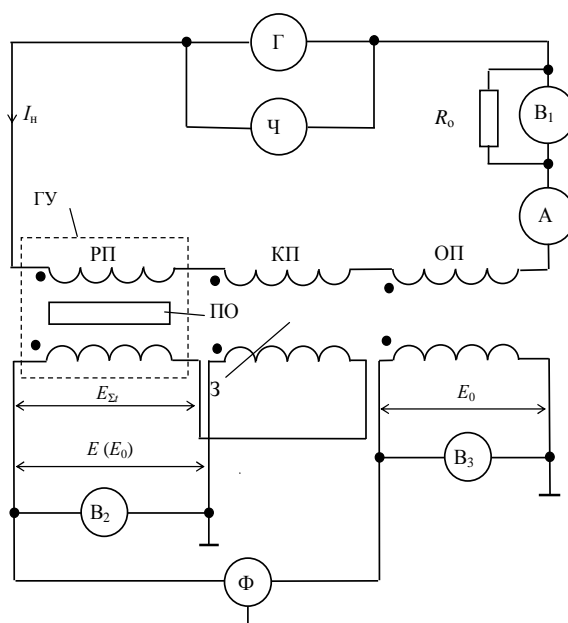


Рис. 1. Многопараметровый вихретоковый контроль геометрических, магнитных, электрических и температурных параметров плоского слабоферромагнитного образца.

Схема включает в себя три идентичных вихретоковых преобразователя: РП (рабочий преобразователь), ОП (опорный преобразователь) и КП (компенсационный преобразователь). Первичные (намагничивающие обмотки) РП, КП и ОП соединены последовательно-согласно, а измерительные (вторичные обмотки) последовательно-встречно [4–8]. С целью повышения методической составляющей достоверности контроля для изменения температуры плоского слабоферромагнитного изделия, используется греющее устройство – ГУ, в котором размещается контролируемый плоский образец – ПО. Схема также содержит: генератор – Г, амперметр – А, вольтметры –  $B_1$ ,  $B_2$  и  $B_3$ , фазометр –  $\Phi$ . В схеме предусмотрена полная компенсация ЭДС  $E_0$ , которая достигается путем изменения витков вторичной обмотки КП, выполненного в виде вариометра (при отсутствии в ТВД плоского образца) [9]. Именно, благодаря, полной компенсации, повышается инструментальная составляющая достоверности контроля, так как полная компенсация позволяет существенно уменьшить погрешности измерений, связанные с влиянием паразитной ЭДС  $E_1$ , а по сравнению с результатами работ [4-8], авторы которых применяли частичную компенсацию ЭДС  $E_1$ , снизить погрешности измерений, связанные с недокомпенсацией и перекомпенсацией. Инструментальная составляющая достоверности контроля  $D_{и}$ , определяется по формуле [10]

$$D_{и} = 1 - \alpha - \beta, \quad (2)$$

где  $\alpha$  и  $\beta$  – ошибки 1-го и 2-го рода.

Таким образом, при наличии нагреваемого плоского изделия в тепловом ТВД, находим коэффициент заполнения ТВД плоским изделием  $\eta$  и площадь поперечного сечения пластины (при измеренных значениях  $E_{вн1}$ ,  $E_0$  и  $\Phi_{вн1}$ ),

воспользовавшись универсальными функциями преобразования, которые приведены на рис. 2а и 2б

$$\eta = \frac{E_{\text{ВН}t}}{4,44 f w_{\text{и}} d_k h_k \mu_0 H_0 N}, \quad (3)$$

где индекс  $t$  свидетельствует о том, что данная величина зависит от температуры.

Площадь поперечного сечения нагреваемой пластины, определяем по формуле

$$S = \frac{E_{\text{ВН}t}}{4,44 f w_{\text{и}} \mu_0 H_0}, \quad (4)$$

где  $w_{\text{и}}$  – число витков измерительной обмотки;  $\mu_0$  – магнитная постоянная,  $H_0$  – напряжённость магнитного поля ТВД без плоского образца.

Намагниченность плоского слабоферромагнитного образца, находим из выражения

$$j = \frac{k_t \sqrt{2} w_{\text{н}} I_{\text{н}}}{l_{\text{н}}}. \quad (5)$$

где  $w_{\text{н}}$  – число витков намагничивающей обмотки;  $l_{\text{н}}$  – длина намагничивающей обмотки;  $I_{\text{н}}$  – намагничивающий ток;  $k_t$  – магнитная восприимчивость.

Следует отметить, что измерение разностной ЭДС теплового ТВД  $E_{\text{ВН}t}$ , позволяет более точно определить термозависимые магнитные параметры контролируемого плоского образца: намагниченность  $j_t$ , магнитную восприимчивость  $k_t$  и относительную магнитную проницаемость  $\mu_{rt}$ , что в свою очередь, также приводит к повышению инструментальной составляющей достоверности контроля

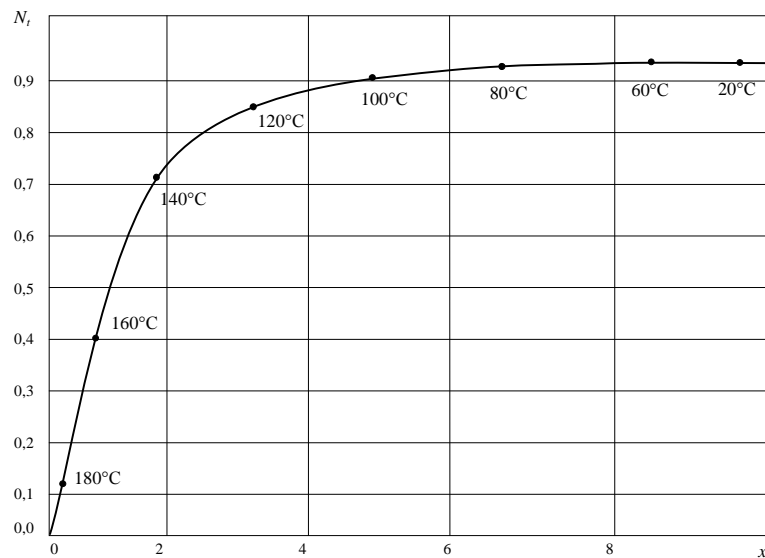


Рис. 2а. Зависимость вносимой нормированной ЭДС теплового ТВД от обобщенного параметра  $x_t$  с учётом изменения температуры пластины.

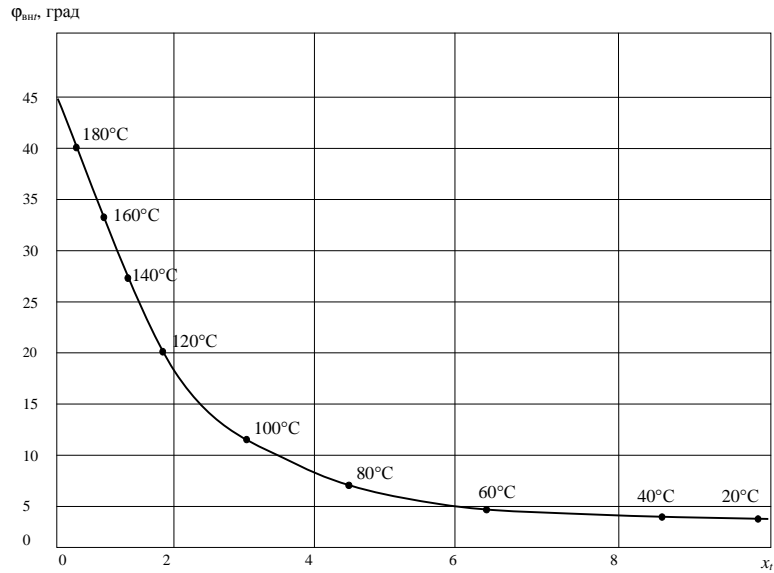


Рис. 26. Зависимость вносимого фазового угла теплового ТВД с нагреваемой пластиной, от параметра  $x_t$ .

Далее находим магнитную восприимчивость контролируемого плоского слабоферромагнитного образца

$$k_t = \frac{E_{внт}}{4,44 f w_{и} \mu_0 S H} . \quad (6)$$

Относительную магнитную проницаемость  $\mu_{rt}$ , определяем из выражения

$$\mu_r = 1 + \frac{E_{внт}}{4,44 f w_{и} \mu_0 S H} . \quad (7)$$

Удельную электрическую проводимость  $\sigma_t$ , нагреваемых в процессе контроля плоских изделий, находим по формуле

$$\sigma_t = \frac{x_t^2 E_0^2 N_t^2 h^2}{\pi E_{внт}^2 d_k^2 h_k^2 \mu_{rt} f \mu_0} . \quad (8)$$

Для повышения достоверности контроля, температуру плоских слабоферромагнитных изделий, находим из выражения

$$t = \left( \frac{1 + \alpha t_1}{\alpha} \right) \left( \frac{\sigma_1 x_t^2 E_0^2 N_t^2 h^2}{\pi E_{внт}^2 d_k^2 h_k^2 \mu_{rt} f \mu_0} - 1 \right) + t_1 , \quad (9)$$

где  $\alpha$  – температурный коэффициент сопротивления (ТКС);  $t_1$  – начальная температура.

Для расчёта достоверности контроля приведём алгоритм измерительных и вычислительных процедур совместного определения геометрических, магнитных, электрических и температурных параметров плоских слабоферромагнитных изделий. Сначала, используя зависимость  $\phi_{внт} = f(x_t)$  (при измеренных значениях  $E_0$ ,  $E_{внт}$ , и  $\phi_{внт}$ ), определяем параметр  $x_t$  при разных температурах. Затем, применив зависимость  $N_t = f(x_t)$ , находим параметр  $N_t$  в диапазоне температур от 20 до 150°C. Далее с учётом формул (3) и (4), определяем  $\eta$  и площадь поперечного сечения  $S$  контролируемого плоского изделия. По формулам (5) и (6)

находим намагниченность  $j_t$ , магнитную восприимчивость  $k_t$ , а также относительную магнитную проницаемость  $\mu_r$  из выражения (7). Удельную электрическую проводимость  $\sigma_t$  и температуру  $t$  слабоферромагнитных плоских изделий определяем по формулам (8) и (9). Параметры плоского изделия, выполненного из латуни ( $t_1 = 20^\circ\text{C}$ ): ширина  $h = 5$  мм; длина  $l = 50$  мм; толщина  $d = 0,5 \cdot 10^{-3}$  м; температурный коэффициент сопротивления  $\alpha = 4,15 \cdot 10^{-3} \text{ 1/}^\circ\text{C}$ ;  $\rho = 0,179 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ;  $\mu_r = 1,4$ . Параметры теплового ТВД:  $d_k = 2$  мм;  $h_k = 7$  мм; число витков измерительной обмотки  $w_{\text{и}} = 1060$ , число витков намагничивающей обмотки  $w_{\text{н}} = 295$ , напряжённость магнитного поля вне образца  $H_0 = 100 \text{ А/м}$ .

Методическая составляющая достоверности контроля определяется из выражения [10]

$$D_{\text{м}} = \frac{N_1}{N}, \quad (10)$$

где  $N$  – общее количество параметров, которые характеризуют техническое состояние слабоферромагнитного плоского изделия;  $N_1$  – количество параметров, которые вошли в модель контроля.

Для того чтобы определить необходимую точность измерений по  $i$ -му параметру, нужно найти допустимый уровень риска изготовителя  $\alpha$  и уровень риска заказчика  $\beta$ , через уровни рисков по  $i$ -му параметру. Характеристики инструментальной составляющей достоверности контроля  $\alpha$  и  $\beta$ , определяются по формулам работы [10]

$$\alpha = \prod_{i=1}^n (1 - P_i) - \prod_{i=1}^n (1 - P_i - \alpha_i), \quad (11)$$

$$\beta = \prod_{i=1}^n (1 - P_i - \alpha_i + \beta_i) - \prod_{i=1}^n (1 - P_i - \alpha_i). \quad (12)$$

Тогда, с учётом выражений (2), (11) и (12) можно записать

$$D_{\text{и}} = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - P_i) + 2 \prod_{i=1}^n (1 - P_i - \alpha_i) - \prod_{i=1}^n (1 - P_i - \alpha_i + \beta_i). \quad (13)$$

Следует отметить, что инструментальная составляющая достоверности контроля явно выражается не через инструментальные метрологические вероятности контроля по отдельным параметрам контроля, а через характеристики инструментальных метрологических вероятностей контроля, т.е. через  $\alpha_i$  и  $\beta_i$ . В табл. 1 приведены результаты оценки достоверности контроля при реализации известного трёхпараметрового и предложенного в данной работе многопараметрового вихретокового метода.

Следует отметить, что полученные результаты расчётов методических и инструментальных составляющих ( $D_{\text{м}}$  и  $D_{\text{и}}$ ), а также общей достоверности контроля  $D_{\text{общ}}$ , говорят о существенном повышении достоверности контроля и эффективности предложенного здесь метода (см. табл. 1).

Таким образом, по приведенной выше методике были выполнены расчеты методической, инструментальной и общей достоверности контроля. При этом законы распределения измеряемых величин и погрешностей измерений – нормальные. Приняты допущения, что вероятность брака по контролируемым параметрам, составляет  $P_1 = P_2 = P_3 = P_4 = 0,2$ .

Таблица 1. Оценка достоверности контроля

Методы контроля параметров плоских слабоферро магнитных изделий, реализуемые на базе ТВД		Методическая составляющая достоверности контроля			Инструментальная составляющая достоверности контроля $D_{и}$							$D_{общ}$
					Относительная погрешность измерений контролируемых параметров, %							
		Количество контролируемых параметров	Общее количество параметров	$D_{м}$	№1	№2	№3	№4	№5	№6	$D_{и}$	
Контроль параметров слабо ферро магнитных пластин	Существующий метод	3	6	0,975	3	2,8	2,5	–	–	–	0,8	0,78
	Разработанный метод	6		1	0,54	1,68	1,85	3,77	0,58	0,6	0,98	0,98

### III. Выводы.

Таким образом, в рамках решения важной научно-практической проблемы, которая состоит в создании вихретоковых методов и устройств измерительного контроля геометрических, магнитных, электрических и температурных параметров, позволяющих повысить достоверность контроля параметров плоских изделий, дана оценка достоверности контроля при реализации многопараметрового вихретокового метода совместного контроля геометрических, магнитных, электрических и температурных параметров и известного трёхпараметрового вихретокового метода [8]. Получены основные соотношения, описывающие многопараметровый метод вихретокового измерительного контроля площади поперечного сечения  $S$ , намагниченности  $j_t$ , магнитной восприимчивости  $k_t$ , относительной магнитной проницаемости  $\mu_{rt}$ , удельной электрической проводимости  $\sigma_t$  и температуры  $t$  контролируемых плоских образцов.

Найдены численные значения инструментальной, методической составляющих и общей достоверности контроля. Анализ расчётов показывает, что при реализации известного метода общая достоверность контроля составляет  $D_{общ} = 0,78$ . В то время как предложенный метод, даёт возможность определить шесть параметров и при этом общая достоверность контроля  $D_{общ} = 0,98$ . Полученные результаты свидетельствуют о существенном повышении общей достоверности контроля и, как следствие, эффективности предложенного многопараметрового вихретокового метода.

Научной новизной настоящей работы, является повышение достоверности контроля параметров слабоферромагнитных плоских изделий при реализации

предложенного многопараметрового метода измерительного вихретокового контроля.

Практическим значением работы является разработанный алгоритм измерительного вихретокового контроля площади поперечного сечения  $S$ , намагниченности  $j_t$ , магнитной восприимчивости  $k_t$ , относительной магнитной проницаемости  $\mu_r$ , удельной электрической проводимости  $\sigma_t$  и температуры  $t$  слабоферромагнитных пластин, который даёт возможность повысить достоверность контроля параметров плоских изделий. Перспективы дальнейших исследований состоят в разработке вариантов автоматизации процесса многопараметрового измерительного контроля параметров плоских изделий широкого ассортимента на базе бесконтактных (трансформаторных и параметрических) тепловых вихретоковых преобразователей.

**Список литературы:** 1. Ключев В.В., Файнгоиз М.Л. Контроль несоосными накладными экранными преобразователями движущейся полосы // Дефектоскопия. – 1974. – № 3. – С. 24-29. 2. Гончаров Б.В. Теория и практика безэталонных электромагнитных методов контроля. – М.: Машиностроение, 1975. – 40 с. 3. Неразрушающий контроль. В 5 кн., кн.3. Электромагнитный контроль / Под ред. В.В. Сухорукова. – М.: Высш. шк., 1992. – 312 с. 4. Себко В.П., Игнатъева С.Н. Оценка методических погрешностей определения характеристик сплошных плоских изделий // Наукові праці II-ї Міжнародної науково-технічної конференції "Метрологія в електроніці – 97". – Харків: ДНВО "Метрологія". – 1997. – Т. 2. – С. 190-192. 5. Глоба С.Н. Универсальное электромагнитное устройство для контроля разомкнутых стальных пластин. - Вестник Харьковского государственного политехнического университета. – Харьков: ХГПУ. – 1999. – Вып. 37. – С. 28-30. 6. Себко В.П., Кириченко Р.И. Электромагнитный метод определения двух параметров плоского изделия на основе экстремума фазового угла преобразователя // Наукові праці III-ї Міжнародної науково-технічної конференції "Метрологія та вимірювальна техніка (Метрологія 2002)". – Харків. – 2002. – С. 129-132. 7. Себко В.П., Кириченко Р.И. Погрешности одновременного определения магнитной проницаемости и электропроводности плоского изделия // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". – Харків: НТУ "ХПИ". – 2002. – № 9. – С. 129-132. 8. Себко В.П., Шади О.Ю. Отман. Экстремальный трехпараметровый вихретоковый преобразователь с плоским проводящим изделием // Вестник Национального технического университета "Харьковский политехнический институт". – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2003. – Вып. 9. – С. 91-100. 9. Себко В.В. Трансформаторный вихретоковый датчик с пластиной, зондируемой полем кратных частот // Український метрологічний журнал. – Харків. – 2007. – Вип. 2. – С. 26-29. 10. Дунаев Б.Б. Точность измерений при контроле качества. – К.: Техніка, 1981. – 150 с.

sebkov@mail.ru